

Opinnäytetyö (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

Koneautomaatio

2017

Taisto Vainio

OSAKOKOONPANON SÄHKÖISTEN KOMPONENTTIEN TESTAUS

Taisto Vainio

OSAKOKOONPANON SÄHKÖISTEN KOMPONENTTIEN TESTAUS

Opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella testauslaitteisto Cencorp Automation Oy:n tuotannon osakokoonpanojen sähköisten komponenttien testaamiseen. Valmistettavien jyrsin- ja ladontakoneiden akselistomoduulien osakokoonpanojen testauksella pyrittiin havaitsemaan mahdolliset vikatilanteet ennen loppukokoonpanoa, jolloin niiden korjaaminen olisi helpompaa. Mahdolliset korjaustoimet saataisiin myös ajallisesti siirrettyä aikaisempaan vaiheeseen, joka edesauttaisi tuoteprojektien pysymistä aikataulussa.

Työssä suunniteltiin jigi, jota voitaisiin käyttää apuna kaikkien testattavien moduulien kokoonpanossa sekä varsinaisessa testauksessa. Testaus tapahtuu kytkemällä akselistomoduulien kenttäväylään ja ohjaamalla sekä monitoroimalla niissä olevien I/O-korttien tiloja.

Testauslaitteiston ohjelmisto asennettiin RaspberryPi3-tietokoneeseen, johon asennettiin myös tarvittavat komponenttikirjastot kenttäväylään kytkemistä varten. Testauksen suoritusta varten ohjelmoitiin graafinen käyttöliittymä.

Kaikissa valinnoissa pyrittiin kustannusten minimoimiseen, mikä osaltaan vaikutti tavoitteiden saavuttamiseen. Kaikkia työlle asetettuja tavoitteita ei saavutettu, mutta puuttuvien toiminnallisuuksien lisääminen nyt suunniteltuun järjestelmään on myöhemmin mahdollista.

Työssä onnistuttiin toteuttamaan testausjärjestelmä, joka kattaa yksinkertaisen I/O-testauksen. Tällä järjestelmällä saadaan kiinni kappalemäärällisesti suurin osa moduulien vioista. Moduulien servomootorit tulevat toimittajalta valmiiksi testattuina, joten niissä ilmenneiden vikojen todennäköisyys arvioitiin pieneksi.

ASIASANAT:

Automaatio, Mekaniikkasuunnittelu, Kenttäväylä, EtherCAT.

Taisto Vainio

TESTING OF ELECTRICAL COMPONENTS IN SUB-ASSEMBLY

The purpose of this thesis was to design a test system for Cencorp Automation Oy production that could be used to test electrical components in sub-assemblies. The target of testing was to identify possible problems earlier in the timeline and thus enable earlier correcting of them. The possible problems found would be easier to correct in sub-assembly phase and also the possible root cause of the problems could be analyzed more easily.

In this project, a jig that could be used for producing sub-assemblies was designed, but that same jig could also be used for testing purposes. The jig was designed to cover all currently produced models.

The actual test system consists of RaspberryPi3 computer, running a Linux operating system and various software components, needed to connect to EtherCAT fieldbus. Testing is performed using a graphical user interface programmed with Qt4.

All solutions were selected based on the direct costs and partly for that reason, some of the targets were not achieved. However, there were no known limitations in the current system, if those features need to be added later.

With the current test system, it was possible to perform a basic I/O-testing, which will cover most of the possible problems. The examination of the servo- and linear motors was left out of the scope of this thesis, but that was not seen as a problem as those motors are tested by the supplier.

KEYWORDS:

Automation, Mechanical design, Fieldbus, EtherCAT.

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO	7
1 JOHDANTO	8
2 CENCORP AUTOMATION OY	9
2.1 Historia	9
2.2 Tuotteet	9
2.2.1 Piirilevyjyrsimet, 1000 BR EVO, 1300 BR, 1300 SR	10
2.2.2 Ladontakoneet, 850 OF, 1000 OF EVO, 1500 OF	11
2.2.3 Lasermerkintä, 300 LM, 700 LM, 800 LMR	11
2.2.4 Testausautomaatio, 501 SL, XPRS	13
2.2.5 Tuotantoautomaatio, 1300 FA	14
3 LÄHTÖKOHDAT	15
3.1 Tavoitteet	15
3.2 Esisuunnittelu	15
3.3 Investointipäätös / Kannattavuuslaskelma	16
4 SUUNNITTELU	18
4.1 Konedirektiivi ja riskin arviointi	18
4.2 Mekaniikkasuunnittelu	18
4.2.1 Lineaariliike	19
4.2.2 Jigin mitoitus	21
4.3 Sähkö- ja pneumatiikkasuunnittelu	21
4.4 Ohjelmistosuunnittelu	22
4.4.1 EtherCAT-kenttäväylä	23
4.4.2 EtherLab EtherCAT Master -kirjasto	23
4.4.3 EtherLab PdServ -kirjasto	24
4.4.4 EtherLab MSR -protokolla	24
4.4.5 EtherLab PdCom -kirjasto	24
4.4.6 EtherLab Testmanager -ohjelmisto	25
4.4.7 EtherLab QtPdWidgets -kirjasto	25
4.4.8 Qt kehitysympäristö	25
5 TURVALLISUUS KONEEN RAKENNUKSESSA	26

5.1 Työturvallisuuslaki 738/2002	26
5.2 Käyttöasetus 403/2008	26
5.3 Konedirektiivi 2006/42/EY	27
5.4 Koneturvallisuuden A-standardi ISO 12100	28
5.5 Riskin arviointi SFS-ISO/TR 14121-2	28

6 TOTEUTUS 29

6.1 Mekaniikka	29
6.2 Pneumatiikka ja sähköistys	30
6.3 Ohjelmisto	32
6.3.1 EtherCAT Master -kirjaston käyttöönotto	32
6.3.2 PdServ-kirjaston käyttöönotto	35
6.3.3 Asiakasohjelmisto ja käyttöliittymä	38
6.4 Testaus	40
6.5 Testauslaitteen käyttöohje	41

7 TULOSTEN ANALYSOINTI 43

7.1 Aikataulu	43
7.2 Budjetti	43
7.3 Tavoitteet	43
7.4 Jatkokehitys	44

LÄHTEET 45

KUVAT

Kuva 1. Piirilevyjyrsin- 1000 BR EVO (Cencorp 2017d).	10
Kuva 2. Ladontakoneen tarttuja (Cencorp 2017d).	11
Kuva 3. Moduulien lasermerkintä (Cencorp 2017d).	12
Kuva 4. Esimerkkejä lasermerkinnästä, 300 LM (Cencorp 2017e).	13
Kuva 5. Kokoonpanosolu- 1300 FA (Cencorp 2017d).	14
Kuva 6. AluFlexin liukukisko (AluFlex 2017).	19
Kuva 7. Modular Componentsin liukukisko (Modular Components 2017).	20
Kuva 8. MayTecin valmistama teleskooppijärjestelmä (MayTec 2017).	21
Kuva 9. Jigin SolidWorks-malli.	30
Kuva 10. Paineilman syöttö.	31
Kuva 11. Testauslaitteen kytkentäkaavio.	31
Kuva 12. EtherCAT-moduuli käynnissä.	32
Kuva 13. Laitteet tunnistettu EtherCAT-väylässä.	32
Kuva 14. Kaikki väylältä löydettyt moduulit.	33
Kuva 15. Väylän orjien PDO-osoitteita.	34

Kuva 16. Esimerkki pääohjelmasta. (EtherLab 2017a.)	34
Kuva 17. Esimerkki prosessidatan käsittelystä.	35
Kuva 18. PdServ-kirjaston periaatteellinen käyttö.	36
Kuva 19. Palvelinohjelmisto käynnissä.	37
Kuva 20. TestManager ohjelmisto.	37
Kuva 21. Qt pääohjelma.	38
Kuva 22. Käyttöliittymän muuttujien linkittäminen MSR-protokollaan.	39
Kuva 23. Käyttöliittymän komponentteja.	40
Kuva 24. Testauksessa ja kehityksessä käytetty väylämoduuli.	41

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO

Beckhoff	Saksalainen automaatiokomponenttien valmistaja
BR	Piirilevyjyrsin (Bottom Router)
EtherCAT	Beckhoffin suunnittelema kenttäväyläprotokolla
EtherLab	Ohjelmistokokonaisuus EtherCAT kenttäväylän testaus- ja automatisointitarkoituksiin
I/O	Tulot ja lähdöt (Input/Output)
Inline-järjestelmä	Laite on kiinteä osa automatisoitua tuotantolinjaa
Jigi	Kappaleen kiinnittämiseen suunniteltu komponentti
Kernel	Käyttöjärjestelmän ydin
Linux	Avoimen lähdekoodin käyttöjärjestelmä
LM	Tuoteperhe lasermerkintään (Laser Marker)
OF	Ladontakone läpiladottaville komponenteille (Odd Form)
Offline-järjestelmä	Laitetta käytetään erillään automatisoidusta tuotantolinjasta
PDO	EtherCAT kenttäväylän sanomatyyppi (Process Data Object)
POM	Helposti työstettävä materiaali teknisiin ratkaisuihin (Poly-asetali)
RaspberryPi3	Edullinen luottokorttikokoinen tietokone
Raspbian Jessie	Linux käyttöjärjestelmä RaspberryPi3:lle
Servovahvistin	Vahvistin servo- tai lineaarimoottorin tehonsyöttöön
TwinCat	Beckhoffin ohjelmisto EtherCAT-kenttäväylän konfigurointiin ja ohjaamiseen
Widget	Graafisen käyttöliittymän näkyvä komponentti

1 JOHDANTO

Poka-Yoke (japaninkieliset sanat: poka-virhe, yokeru-välttää) on järjestelmä, jolla pyritään välttämään virheitä tuotannossa. Sen tavoitteena on tuotannon nollavirhetaso. Monimutkaisten tuotteiden laadunvarmistus onnistuu parhaiten hajauttamalla se yli tuotantoprosessin. Siten jokaisen työvaiheen lopputuloksena on virheetön tuote. Jos jossakin työvaiheessa havaitaan virhe, on sen lähde nopeammin todennettavissa ja korjattavissa. Viallisen tuotteen eteneminen ei kuormita myöhempiä vaiheita, mikä puolestaan tehostaa tuotantoa. (Toyota 2016.)

Tämän opinnäytetyön aiheena oli testausjärjestelmän suunnittelu, joka mahdollistaisi yhden tuotannon työvaiheen jälkeisen sähköisen testauksen ja laadunvarmistuksen. Järjestelmän suunnittelu liittyi läheisesti tutkintoon sisältyviin opintokokonaisuuksiin, kuten mekaniikka- ja automaatio suunnittelu sekä teollisuuden ohjausjärjestelmät.

Opinnäytetyö toteutettiin toimeksiantona Cencorp Automation Oy:lle. Järjestelmän suunnittelun lähtökohtana oli laitteiston edullisuus ja siten siitä saatavan taloudellisen hyödyn maksimointi. Järjestelmän mekaaninen toteutus suunniteltiin erillään varsinaisesta testauksesta, joka mahdollistaisi testausjigin käytön myös pelkässä kokoonpanotyössä. Testauksen osalta, olemassa oleviin rajapintoihin pyrittiin liittymään mahdollisimman edullisilla ja yksinkertaisilla ratkaisuilla, joka osaltaan tuottaisi kustannustehokkaan ratkaisun.

Ohjelmistokomponentteihin tutustuminen muodosti suuren osan työn tekemiseen käytetävästä ajasta. Eri komponenttien rakenteiden ja käytettävien rajapintojen hallinta, muodostivat olennaisen osan työn toteutuksesta. Työssä perehdyttiin muun muassa erilaisiin mahdollisuuksiin kytkeytyä EtherCAT-kenttäväylään.

Varsinaisen moduulien testauksen suorittavat työntekijät, käyttäen luotuja testaus- ja käyttöohjeita. Ideaalisessa tilanteessa moduulin testaa sen koonnut työntekijä, jolloin palaute mahdollisesti löydettyistä ongelmista tulee automaattisesti oikealle henkilölle. Testauksen tuloksena saadaan testiraportti, joka sisältää testitulokset. Testiraportti sisältää myös oleelliset tiedot testauksen jäljitettävyyden kannalta, kuten testattavan moduulin yksilölliset tiedot.

2 CENCORP AUTOMATION OY

Cencorp Automation Oy (jatkossa Cencorp), on yksi maailman johtavista prosessiautomaation tuottajista omalla osaamisalueellaan. Tuotevalikoima sisältää piirilevyjyrsimiä, ladontakoneita, lasermerkintä ja -hitsauslaitteita, sekä erilaisia ratkaisuja loppukokoonpanoon ja testaukseen. Kaikki tuotteet räätälöidään asiakkaan tuotantoprosessin tarpeisiin, mikä osaltaan parantaa tuottavuutta ja laatua. Cencorpin asiakkaita ovat johtavat elektroniikka-, tietoliikenne- ja teollisuuselektroniikka-alan yritykset.

Cencorp on yksityinen yritys, jonka pääkonttori sijaitsee Salossa. Laitteet valmistetaan ja suunnitellaan Suomessa. Maailmanlaajuinen myynti, jakelu ja ylläpito vastaavat tuotteiden toimivuudesta kaikilla päämarkkinoilla. Yhtiö työllistää yli 100 ammattilaista Suomessa, Yhdysvalloissa, Saksassa, Ranskassa ja Kiinassa. (Cencorp 2017a.)

2.1 Historia

Yhtiön pitkä ja vaiherikas historia voidaan ulottaa vuoteen 1948, jolloin perustettiin elektroniikan komponentteja ja niiden valmistustekniikkaa kehittävä Evox Oy. Yhtiön nimen perusta puolestaan on vuonna 1978 perustettu Colorado Engineering Corporation (Cencorp Inc.). Nykyisten kaltaisten ladontakoneiden historia alkaa vuodesta 1986, jolloin Evox Oy valmisti ensimmäiset ladontasolut. (Cencorp 2017b.)

Vuodesta 2014 alkaen yhtiön on omistanut FTTK Company Limited, joka on kiinalainen teollisuusautomaatioalan pääomasijoituksiin erikoistunut sijoitusyhtiö. (Cencorp pörssitiedote 2014.)

Vahva kasvustrategia ja merkittävät panostukset uusiin innovaatioihin sekä tuotantokapasiteettiin, ovat johtaneet ylimmän johdon muutoksiin. 27.4.2017 alkaen yhtiön toimitusjohtajaksi on nimitetty Mats Lillqvist. (Cencorp 2017c.)

2.2 Tuotteet

Cencorpin tuotteet perustustuvat yli 30 vuoden kehitystyön tulokseen. Pitkän kokemuksen kautta kehittyneet ratkaisut, tarjoavat ensiluokkaista tuottavuutta ja laatua. Tuote-

portfolio koostuu tehokkaista piirilevyjyrsimistä, ladontakoneista, erilaisista lasertuotteista (leikkaus, hitsaus, poraus), sekä testaus- ja tuotantoautomaatioratkaisuista. Toimitus voi pitää sisällään yksittäisen, pitkälle räätälöidyn solun tai kokonaisen tuotantolinjan.

2.2.1 Piirilevyjyrsimet, 1000 BR EVO, 1300 BR, 1300 SR

Joka päivä lähes miljoona piirilevyä leikataan käyttäen Cencorpin piirilevyjyrsimiä. Piirilevyjyrsimien tuotevalikoima pitää sisällään laajan valikoiman joustavia ja tehokkaita ratkaisuja, jotka soveltuvat niin pieniin, keskisuuriin kuin suurimittaisiinkin tuotantoihin.

Inline-järjestelmät 1300 BR ja 1000 BR EVO (kuva 1), mahdollistavat suuren käsittelykapasiteetin ja joustavuuden, yhdistettynä pieniin työkalukustannuksiin. Offline-järjestelmä 1300 SR, on suunniteltu erityisesti pienille ja keskisuurille tuotantomäärille. (Cencorp 2017d.)



Kuva 1. Piirilevyjyrsin- 1000 BR EVO (Cencorp 2017d).

2.2.2 Ladontakoneet, 850 OF, 1000 OF EVO, 1500 OF

Cencorpin ladontakoneratkaisut (kuva 2) on suunniteltu suurta käsittelykapasiteettia silmällä pitäen. Ladontaprosessin automatisointi on tehokas tapa parantaa kannattavuutta, lisäämällä tuotantokapasiteettia ja kokoonpanon laatua. Tuotevalvonta- ja jäljitystyökalujen ansiosta tuoteperhe täyttää tiukimmatkin laatuvaatimukset. (Cencorp 2017d.)

Hyödyt voidaan mitata kokoonpanon luotettavuudessa, tarkkuudessa ja joustavuudessa, kokoonpanon ja prosessien optimoinnissa, sekä työvoiman ja lattiapinta-alan säästössä.

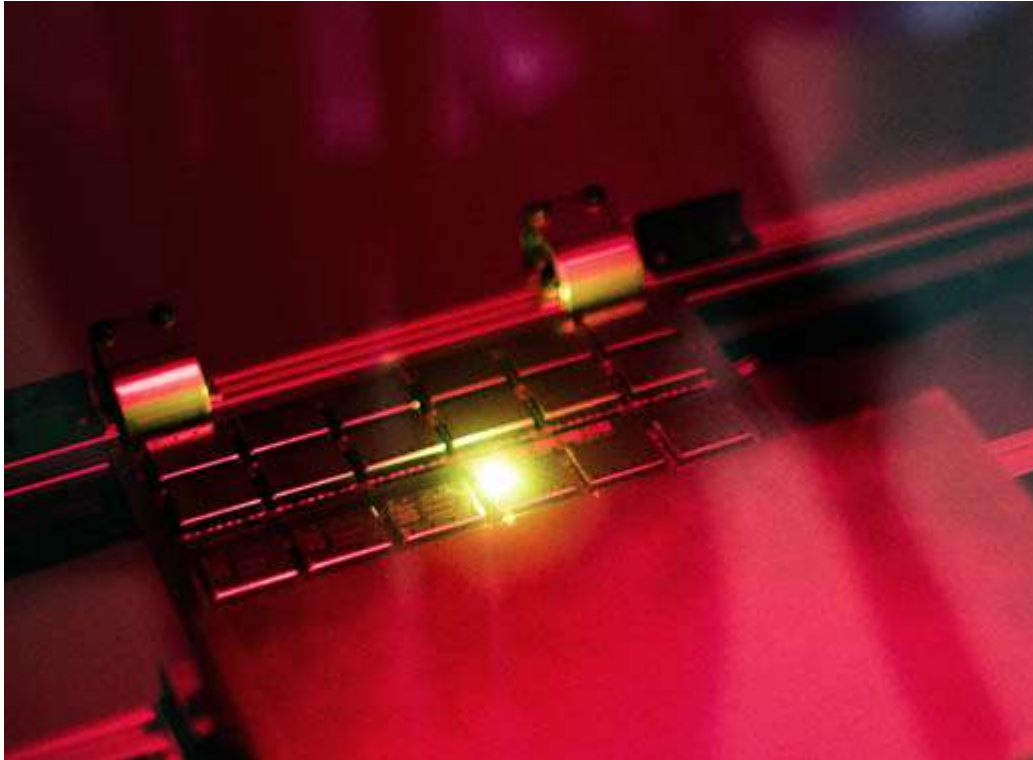


Kuva 2. Ladontakoneen tarttuja (Cencorp 2017d).

2.2.3 Lasermerkintä, 300 LM, 700 LM, 800 LMR

Cencorp tarjoaa laajan valikoiman ratkaisuja lasermerkintään, -leikkaukseen, -hitsaukseen sekä -poraukseen. Kaikki työasemat on suunniteltu vastaamaan raskasta teollista käyttöä. (Cencorp 2017d.)

Työasemien modulaarinen konsepti yhdistettynä useisiin laservaihtoehtoihin mahdollistavat mukautumisen asiakkaiden tarpeisiin. Asiakaskohtaisesti rakennettuja järjestelmiä voidaan toimittaa skanneritekniikalla tai perustuen lineaaristen akseleiden liikkeisiin. Kuvassa 3 on esimerkki elektroniikkateollisuuden moduulien lasermerkinnästä. Kuvassa 4 kaiverruskohteena on tutumpia kuluttajatuotteita.



Kuva 3. Moduulien lasermerkintä (Cencorp 2017d).

Decoration of cutlery



Personalization of mobile phone covers



Kuva 4. Esimerkkejä lasermerkinnästä, 300 LM (Cencorp 2017e).

2.2.4 Testausautomaatio, 501 SL, XPRS

Yli miljoona uutta matkapuhelinta testataan päivittäin käyttäen Cencorpin testauslaitteistoja. Innovatiivinen ja patentoitu monitasoinen testauskonsepti mahdollistaa eri testien samanaikaisen suorittamisen. Testauskohteena voi olla piirilevy, moduuli tai lopputuote. Testaus kattaa tieto- ja viestintätekniikan testauksen, flash-ohjelmistojen lataamisen, sekä RF-testauksen ja virityksen. (Cencorp 2017d.)

2.2.5 Tuotantoautomaatio, 1300 FA

Cencorp tarjoaa innovatiivisia tuotannon automatisointiratkaisuja yksittäisistä soluista täydellisiin tuotantolinjoihin, jotka yhdistävät koko tuotevalikoiman erityisohjelmien ja kolmannen osapuolen laitteiden kanssa. Tuotantoautomaation päätuote on joustava 1300 FA -robottisolu (kuva 5). Tämä solu voidaan helposti konfiguroida monenlaisiin kevyitä osia käsitteleviin sovelluksiin ja kokoonpanotehtäviin. (Cencorp 2017d.)



Kuva 5. Kokoonpanosolu- 1300 FA (Cencorp 2017d).

3 LÄHTÖKOHDAT

Eri tuoteperheiden ja laitteiden mekaanisesta toimintatavasta oli löydettävissä huomattavia yhtäläisyyksiä. Jyrsimet ja ladontakoneet perustuvat tarkkoihin X-, Y- ja Z-suuntaisiin lineaariliikkeisiin. Kaikki akselistomoduulit sisältävät useita antureita ja toimilaitteita.

Testauslaitteen mekaanisen toteutuksen osalta löytyi kaksi olemassa olevaa ratkaisua, joiden käyttäjiä haastatteleamalla saatiin arvokasta tietoa kyseisten ratkaisujen toimivuudesta.

3.1 Tavoitteet

Työn tavoitteena oli eri akselistomoduulien sähköisten komponenttien testauksen suoritus. Alustavasti työ rajattiin koskemaan piirilevyjyrsimen 1000 BR EVO ala-akseliston komponenttien testaus. Laitteisto pyrittäisiin kuitenkin suunnittelemaan siten, että muidenkin akselistomoduulien testaus olisi myöhemmin mahdollista.

3.2 Esisuunnittelu

Esisuunnittelun tavoitteena on selvittää mm. tekniset mahdollisuudet hankkeen toteutukseen sekä taloudelliseen kannattavuuteen. Esisuunnittelun aikana järjestelmän vaatimuksia kuvataan käyttäjän kannalta, asettamatta reunaehtoja toteutukselle. Koska työ toteutettiin toimeksiantona, voidaan hankkeelle todeta olevan todellinen tarve. (Suomen Automaatioseura ry.)

Esisuunnittelu aloitettiin tutustumalla eri akselistomoduuleihin ja niiden sähköisiin rajapintoihin. Tarkempaa tutkimusta suoritettiin mallien 1000 BR EVO, 1300 BR ja 1500 OF akselistomoduuleille. Kaikki mallit pitävät sisällään ns. ylä- ja ala-akselistot, jotka eivät testausmielessä eroa merkittävästi toisistaan. Poikkeuksen tekevät kuitenkin 1000 BR EVO -akselistot, joiden osakokoonpanoon ei kuulu EtherCAT-väyläkomponentteja. 1000 BR EVO akselistomoduulit sisältävät samoja antureita ja toimilaitteita, kuin muutkin moduulit, mutta väyläliityntä on sijoitettu moduulin ulkopuolelle.

Kaikkien moduulien liikkeiden tuottamiseen tarvitaan servovahvistimet. Osassa moduuleista liike on tuotettu servomootoreilla ja kuularuuveilla, mutta osassa käytetään lineaarimootoreita. Samoja servovahvistimia voidaan kuitenkin sopivasti konfiguroimalla käyttää molempien moottorityyppien ohjaamiseen. BR-tuotteissa tarvitaan lisäksi erillinen ohjainyksikkö jyrsinmoottorin ohjaamiseksi.

Testausjärjestelyn mekaniikka edellyttää ratkaisua, joka mahdollistaa kaikkien testattavana olevien akselistomoduulien kiinnittämisen. Sitä silmällä pitäen selvitettiin piirustuksista eri akselistomoduulien mitat. Akselistomoduulin kokoonpanoon perehtymisen yhteydessä kävi ilmi, että yhden mallin kokoonpanoa varten on olemassa eräänlainen jigi. Se on ensisijaisesti suunniteltu moduulin kokoonpanoa varten. Tätä ajatusta jatkojalostettiin siten, että tulevaa testausjigiä voitaisiin käyttää myös kokoonpanon apuna. Sitä varten piirustuksista selvitettiin vielä muutamia oleellisia mittoja.

3.3 Investointipäätös / Kannattavuuslaskelma

Investointeihin liittyy aina riskejä ja epävarmuuksia. Erilaisia laskentatapoja investoinnin kannattavuudelle on olemassa useita. Toisaalta, jos investoinnin koko on pieni, voidaan riskinkin olettaa olevan pieni. Tämä pitää myös erottaa kannattavuuslaskelmasta, sillä pienikin investointi voi luonnollisesti olla kannattamaton. Kannattavuuslaskelman tekemiseen liittyy aina tulevaisuuden ennustamista, jota voi olla hankala suorittaa ilman tarkempia tutkimuksia tai olemassa olevaa tietoa menneisyydestä. (Laukkanen Paavo, 2013).

Tämän hankkeen osalta investointipäätös oli tavallaan jo tehty, koska tehtävä oli saatu toimeksiantona. Kannattavuutta pyrittiin parantamaan minimoimalla tulevan investoinnin suuruutta, sekä toisaalta valitsemalla testauksen osa-alueiksi parhaan panos/tulos-suhteen tuottava ratkaisu.

Akselistomoduulien testaukseen tarvittavien ulkoisten komponenttien määrä oli riippuvainen halutun testauksen kattavuudesta. Esisuunnittelussa todettiin minimivaatimukseksi testauksen suorittamiselle EtherCAT-väyläisäntä, jolla voitaisiin suorittaa yksinkertaista I/O-testausta (perus anturit ja toimilaitteet). Jos testausta olisi haluttu laajentaa jyrsin- ja/tai servomootoreihin, olisi testauslaitteistoon tarvittu näiden ohjaamiseen tarkoitetut komponentit. Näiden komponenttien mukaan ottaminen olisi moninkertaistanut laitteiston arvon.

Lopputuotteiden ylös ajosta vastaavia henkilöitä haastatteleamalla selvisi, että rikkinäisten servomoottoreiden osuus verrattuna muihin ongelmiin on merkityksetön. Käytettävät moottori myös testataan valmistajan toimesta ennen niiden lähetystä asiakkaalle. Ongelmat servomoottoreissa ovat yleensä liittyneet kaapelointi- tai liitinongelmiin.

Jyrsin- ja servomoottoreiden testaus on kuitenkin myöhemmin mahdollista liittää osaksi järjestelyä. Niiden käsittely onnistuu hankkimalla tarvittavat ohjauslaitteistot ja lisäämällä niiden ohjaus olemassa olevaan ohjelmistoon. Jos kyseisiä servomoottoreita halutaan liikutella testauksen aikana, tulee huomioon ottaa myös siitä aiheutuvat vaaratekijät. Tämä tarkoittaa käytännössä testattavan akselistomoduulin eristämistä kiinteillä suojoilla testauksen ajaksi.

4 SUUNNITTELU

4.1 Konedirektiivi ja riskin arviointi

Konedirektiivi 2006/42/EY (koneasetus 400/2008) ohjaa koneen valmistajaa turvallisen koneen suunnittelussa. Kaikkien koneiden on oltava turvallisia, riippumatta niiden käyttötarkoituksesta. Koneiden suunnittelussa kannattaa käyttää yhdenmukaistettuja standardeja, jos sellaisia on saatavana. Niitä noudattamalla, kone todennäköisesti täyttää tarvittavat vaatimukset turvallisuudesta. Riippumatta siitä, onko kyseiselle koneelle saatavissa yhdenmukaistettuja standardeja, on kaikille koneille suoritettava riskin arviointi.

Standardi SFS-EN ISO 12100 määrittelee yleiset suunnitteluperiaatteet ja ohjeet turvallisten koneiden suunnittelulle. Se myös määrittelee iteratiivisen prosessin koneen riskien arvioinniksi ja pienentämiseksi hyväksyttävälle tasolle. Koneen suunnitteluvaiheessa, mahdollisia riskejä pyritään poistamaan suunnittelutoimenpiteillä. Jos nämä keinot eivät riitä, täytyy koneeseen suunnitella erillisiä suojausteknisiä ratkaisuja. Viimeinen vaihtoehto koneen turvallistamisessa on varoituskilpien ja -laitteiden asentaminen, sekä käyttäjän tiedottaminen jäännösriskeistä käyttöohjekirjassa. Standardin liitteessä B, luetaan kattava joukko esimerkkejä vaaroista, vaaratilanteista ja vaarallisista tapahtumista.

Standardin SFS-ISO/TR 14121-2 tekninen raportti, antaa käytännön opastusta ja esimerkkejä liittyen riskin arviointiin. Standardin liitteessä A, on kuvattu riskin arvioinnin ja pienentämisen prosessi esimerkinomaisesti alajyrsinkoneelle, standardin SFS-EN ISO 12100 periaatteiden mukaisesti. Kyseisessä esimerkissä riskin suuruuden arviointiin on käytetty riskigraafia. Riskin arvioinnissa on huomioitava, että riskin arvioinnin tulee kattaa tuotteen koko elinkaari.

4.2 Mekaniikkasuunnittelu

Mekaniikan suunnittelu aloitettiin tutustumalla olemassa olevaan asennusjigiin. Sen käyttäjiä haastatteleamalla saatiin arvokasta tietoa jigin hyvistä ja huonoista ominaisuuksista. Suurin puute kyseisessä jigissä oli sen soveltumattomuus eri akselistomoduuleille, sillä jigi oli suunniteltu vain yhden mallin kokoonpanoon.

Varkauden toimipisteellä käytössä oleva jigi puolestaan oli osittain säädettävä, mutta se oli suunniteltu melko massiiviseksi. Uuden jigin suunnittelussa yhtenä toivomuksena oli sen mahdollinen sijoitus käytettävien työpöytien päälle. Työpöydissä on alla pyörät, jotka mahdollistavat akselistomoduulin kääntelyn ja siirtämisen. Työpöydät ovat sähköisesti korkeussäädettäviä, jolla voidaan parantaa työergonomiaa ja siten myös laatua, tarkkuutta vaativissa tehtävissä.

Näiden tietojen pohjalta hahmoteltiin muutamia erilaisia ratkaisuja uudeksi asennusjigiksi. Kaikissa hahmotelmissa pyrittiin kiinnittämään huomiota yksinkertaiseen rakentamiseen ja säädettävyyteen. Toimivimmaksi ratkaisuksi säädettävyydelle oli helppo valita portaaton, lineaarinen liike. Se mahdollistaisi nopean ja helpon säädettävyyden nykyisten ja myös tulevien mallien fyysisille mitoille.

4.2.1 Lineaariliike

Erityyppisiä mekaanisia ratkaisuja lineaarisen liikkeen toteuttamiselle on useita. Ensimmäisenä vaihtoehtona tutkittiin kuvan 6 tyyppistä liukukiskoa, joka muistuttaa keittiön laatikoston kiskoa. Sen hyviä puolia olivat ehdottomasti saatavuus ja hinta. Teknisiä tietoja tutkiessa huomattiin, että maksimi kuormitettavuus ilmoitettiin lähes poikkeuksetta kiskoparille. Laatikostoa ajatellen tämä olikin ymmärrettävää.

Kiskon muoto antaa myös viitteitä kestävästä asennussuunnasta. Vaakatasoon käännettynä kyseinen muoto taipuu sekä estää kiskon liikkumisen. Kuormitettavuutta kaikissa suunnissa olisi voitu parantaa ylimitoittamalla kiskon koko.



Kuva 6. AluFlexin liukukisko (AluFlex 2017).



Kuva 7. Modular Componentsin liukukisko (Modular Components 2017).

Modular Componentsin valmistama liukuprofiili (kuva 7) mahdollistaisi helpon kokoonpanon jatkamisen erilaisilla alumiiniprofiilituotteilla. Kyseinen ratkaisu edellyttäisi myös kahden profiilin käyttöä, kuten AluFlexin liukukisko.

Jigin säädettävyyttä tarvitaan ainoastaan tuotteen vaihtuessa. Jigin säätö suoritetaan ennen akselistomoduulin kokoonpanon aloittamista, jolloin jigiin ei kohdistu moduulin painoa. Liukuominaisuuden ei siten tarvitse välttämättä olla laakeroitu.

MayTecin valmistamat alumiiniprofiilit (kuva 8), toteuttavat halutun vaatimuksen lineaariliikkeestä. Ne kestävät kuormitusta kaikissa suunnissa, mukaan lukien kiertoa kohtisuoraan lineaariliikkeeseen nähden. Kyseinen profiili mahdollistaa myös jigin helpon kokoonpanon, koska liitokset voidaan toteuttaa ruuviliitoksina.



Kuva 8. MayTecin valmistama teleskooppijärjestelmä (MayTec 2017).

4.2.2 Jigin mitoitus

Tarkempi suunnittelu aloitettiin keräämällä olemassa olevien akselistomoduulien mittatietoja. Säädetävyyden arviointiin tarvittiin lyhimmän ja pisimmän akseliston mitat. Akselipalkin kiinnitys jigiin suoritetaan käyttämällä samoja kiinnityspisteitä kuin loppukoonpanossa. Akselipalkkien kiinnitysreikien etäisyydet vaihtelivat välillä 857 mm – 1290 mm, joten säädön suuruudeksi saatiin siis minimissään 433 mm.

Muita huomioon otettavia etäisyyksiä olivat akselipalkin ja jigin väliin jätettävä tyhjä tila, palkkien erilaiset leveydet sekä profiilit. Moduulin kokoonpanoon kuuluu myös energiansiirtoketjut, joiden väliaikaisessa kiinnityksessä on käytetty sitä varten koneistettuja adaptoreita. Suunnittelussa ratkaisussa näiden adaptoreiden käytöstä voidaan luopua. Akselipalkin ollessa kiinni jigissä, todettiin korkeussuunnassa eniten tilaa tarvittavan jyrsinmoottorin vaihtoon. Siitä johtuen akselipalkin alareunan ja työtason, johon jigi kiinnitettäisiin, välinen etäisyys tulisi olla vähintään 150 mm.

4.3 Sähkö- ja pneumatiikkasuunnittelu

Esisuunnittelun aikana oli selvitetty yleisesti moduulien rajapintoja ja todettu 1000 BR EVO -mallin akselistojen poikkeavan testausjärjestelyn osalta olennaisesti muista. Kaikkien akselistomoduulien käyttö ja testaus edellyttävät kuitenkin 24 V tasajännitesyöttöä.

Kaikki anturit ja toimilaitteet, pois lukien servo- ja lineaarimoottorit, sekä jyrsinmoottorit, toimivat standardin mukaisella 24 V jännitteellä.

Pneumatiikkaa käytetään yleisesti erilaisten mekaanisten liikkeiden toteutuksiin koneissa ja laitteissa. Akselistomoduuleissa paineilmasylintereillä liikutetaan mm. jyrsimen yhteydessä olevaa imulaippaa, joka on yhdistetty imuriin. Sen tehtävänä on imeä jyrsinässä syntyneet hiukkaset hallitusti niin, etteivät ne pääse leviämään koneen sisälle. Jyrsinmoottorin terän lukitus on myös paineilmakäyttöinen. Kun terän lukitusmekanismiin johdetaan paine, voidaan terä irrottaa vaihtamista varten. Paineilmaventtiilien on/off-tyyppinen ohjaus onnistuu useimmiten suoraan ohjaavan laitteen lähtöporteista.

Testauslaitteiston sähkösuunnittelu koostui pääasiassa 24 V jännitesyötön järjestämisestä testattavalle moduulille. Laitteet kytketään verkkovirtaan yksivaiheisella maadoitettulla pistotulpalla. Pääkytkimen jälkeen asennetaan johdonsuojakatkaisija (automaattisulake) ja vikavirtasuojat. Näiden jälkeen voidaan kytkeä 24 V virtalähde moduuleita varten. Kotelo johon laitteet asennetaan, kytketään pistotulpan suojamaajohtimeen. Virtalähteen tasasähköpuolen miinusnapa kytketään myös laitteen runkoon tai suojamaadoituskiskoon. Virtalähteen jännitelähdön ja testattavan moduulin väliin asennetaan myös sulake. Verkkovirtaosien turvallisen toiminnan toteuttamiseen tarvitaan siihen pätevä henkilö. Suojamaadoitusten ja vikavirtasuojien toimivuus todennetaan tarpeellisilla mittauksilla (SFS-EN 60204-1) sekä merkitään mittauspöytäkirjaan.

Testauslaitteen runkoon asennetaan pikaliitin, paineilmasyöttöä varten. Pikaliittimeltä ilma johdetaan käsin ohjattavalle venttiilille, jolla testauslaitteen paineilman syöttö voidaan kytkeä päälle ja pois. Venttiilin jälkeen asennetaan suodatin / vedenerotin, painesäädin ja painemittari. Näiden jälkeen asennetaan vielä sähköisesti ohjattava venttiili, josta paineilman syöttö tapahtuu testattavalle moduulille.

4.4 Ohjelmistosuunnittelu

Testauslaitteiston ohjelmistosuunnittelu aloitettiin kartoittamalla vaihtoehtoja EtherCAT-kenttäväylään liittymiselle. Heikki Korhosen kandidaatintyössä, EtherCAT-isäntä Linuxissa, on vertailtu viittä eri EtherCAT ohjelmistokirjastoa. CODESYSin toteutus on kaupallinen, jonka ilmaisversio toimii kaksi tuntia kerrallaan. Useimmat muista tutkimuksen alla olleista ohjelmistokirjastoista perustuivat EtherLabin EtherCAT Master toteutukseen. (Korhonen 2016; EtherLab 2017.)

Muita vaihtoehtoja olisi ollut esimerkiksi Beckhoffin TwinCat-ohjelmisto, jonka demoversio toimii 30 päivää. Se olisi vaatinut käyttöjärjestelmäksi jonkin Microsoftin Windows-version, (XP/2000/7/10), josta olisi aiheutunut lisää kuluja lisenssin muodossa. Budjettimielessä parhaaksi vaihtoehdoksi muodostui EtherLabin ohjelmistokirjasto, Linux-käyttöjärjestelmällä, jota voitaisiin ajaa RaspberryPi3-alustalla.

4.4.1 EtherCAT-kenttäväylä

EtherCAT on alun perin Beckhoff Automationin kehittämä reaaliaikainen kenttäväyläprotokolla. Sen suunnittelun perusteena olivat lyhyet kiertoajat ja pieni viiveiden vaihtelu. Nykyään EtherCAT kehityksestä vastaa erillinen työryhmä ETG (EtherCAT Technology Group), joka on maailman suurin teollisen Ethernetin ja kenttäväylien kehittämiseen keskittynyt organisaatio. (EtherCAT 2017.)

4.4.2 EtherLab EtherCAT Master -kirjasto

EtherCAT Master on tarvittavien ohjelmistokomponenttien alimman tason komponentti. Se mahdollistaa EtherCAT-protokollan mukaisen kommunikoinnin isäntä- ja orjalaitteiden välillä. Koska protokollan perusvaatimuksena on reaaliaikaisuus, se ladataan Linux-käyttöjärjestelmään kernel-tason (käyttöjärjestelmän ydin) moduulina. Moduulin täytyy myös pystyä kommunikoimaan Ethernet-laitteiston kanssa, joka onnistuu vain kernel-tason kautta. Varsinainen sovellus/sovellukset suoritetaan käyttäjän osoiteavaruudessa, joka kommunikoi kernel-moduulin kanssa. (EtherLab 2017a.)

EtherCAT Master -komponentin mukana tulee komentorivipohjainen, käyttäjän tilassa ajettava ethercat-sovellus, jolla voidaan tarkastella EtherCAT-väylään kytkettyjen laitteiden tilaa. Sen kommunikointi kernel-moduulin kanssa tapahtuu libethercat-kirjastoa käyttämällä. Tämän kirjaston avulla voidaan kirjoittaa ja suorittaa omia ohjelmia, jotka kommunikoivat kytkettyjen EtherCAT-laitteiden kanssa. (EtherLab 2017a.)

4.4.3 EtherLab PdServ -kirjasto

PdServ-kirjasto mahdollistaa reaaliaikaisen tiedonvälityksen käyttäjän osoiteavaruudessa ajettavan, varsinaisen applikaation ja alemman tason EtherCAT Master -komponentin välillä. PdServ- ja libethercat-kirjastoja käyttämällä kirjoitetaan palvelinohjelmisto, joka huolehtii reaaliaikaisuutta vaativasta laskennasta, esimerkiksi liikkeenohjaukset. Sen kautta tapahtuu myös muu kommunikointi EtherCAT-väylälle. Kirjaston ensisijainen tarkoitus onkin erotella reaaliaikaisuutta vaativat laskennat ja kommunikointi muusta tiedon käsittelystä. PdServ-kirjaston avulla luotu palvelinohjelmisto toteuttaa MSR-protokollan mukaisen liittymän asiakasohjelmistoihin. Siirtotienä se käyttää lähiverkon TCP/IP-protokollaa ja sille määriteltyä porttia, oletuksena 2345. (EtherLab 2017b.)

4.4.4 EtherLab MSR -protokolla

MSR-protokolla on PdServ-kirjaston tukema ASCII-pohjainen XML:n kaltainen tiedonsiirtoprotokolla, jota voidaan käyttää tiedon välitykseen palvelinohjelmiston ja asiakasohjelmiston välillä. Sen tilalla voidaan käyttää myös itse määriteltyä ja ohjelmoitua protokollaa. MSR-protokolla mahdollistaa laiteriippumattoman yhdistämisen palvelinohjelmistoon. Asiakasohjelmisto voi siten sijaita erillisellä tietokoneella, kuten esimerkiksi Windows-käyttöjärjestelmässä toimiva Testmanager. (EtherLab 2017c.)

4.4.5 EtherLab PdCom -kirjasto

PdCom on kirjasto, joka tarjoaa rajapinnan prosessidatan tietojenvälitykseen. Se ei ole riippuvainen käytetystä protokollasta ja siksi sitä voidaan käyttää muun muassa eri käyttöjärjestelmissä. Oletuksena PdCom käyttää MSR-protokollaa, mutta oman protokollan lisääminen on mahdollista. PdCom-kirjaston avulla luodaan varsinainen asiakasohjelmisto. (EtherLab 2017d.)

4.4.6 EtherLab Testmanager -ohjelmisto

Testmanager on Windows-ohjelmisto, joka hyödyntää PdCom-kirjastoa ja MSR-protokollaa. Se mahdollistaa helpon kytketymisen olemassa olevaan prosessiin. Sen graafinen käyttöliittymä on helposti muokattavissa, esittämään halutut prosessiparametrit. (EtherLab 2017e.)

4.4.7 EtherLab QtPdWidgets -kirjasto

QtPdWidgets-kirjasto tarjoaa mahdollisuuden oman Testmanagerin tekemiseen. Se perustuu PdCom-kirjastoon ja MSR-protokollaan kuten Testmanager. QtPdWidgets on kirjasto, joka periyttää Qt4-widgettejä, sekä lisää niille PdCom-kirjaston tarjoamat ominaisuudet yhdistyä ohjattavaan prosessiin. (EtherLab 2017f.)

4.4.8 Qt kehitysympäristö

Qt on norjalaisen Trolltech yhtiön kehittämä alustariippumaton kehitysympäristö. Se on suunniteltu erityisesti käyttöliittymien kehittämiseen, mutta sitä voidaan käyttää myös muuhun ohjelmistokehitykseen. (Qt 2017.)

5 TURVALLISUUS KONEEN RAKENNUKSESSA

Euroopan unioni laatii erityyppisiä säädöksiä, joilla se pyrkii ohjaamaan jäsenmaidensa lainsäädäntöä. Asetukset ovat sitovia ja tulevat voimaan sellaisenaan kaikissa jäsenmaissa. Direktiivi on ohje, jota mukaillen jäsenmaat säätävät omat lait. Päätös täydentää asetuksia ja direktiivejä ja koskee niitä, joille se on osoitettu. Suositus ei ole sitova, eikä sillä ole oikeudellisia velvoitteita. Lakeja valmisteltaessa komiteat antavat lausuntoja, joilla ne ilmaisevat kantansa omasta näkökulmastaan. (Euroopan unioni 2017.)

5.1 Työturvallisuuslaki 738/2002

1§ - Työturvallisuuslain tarkoituksena on parantaa työympäristöä ja työolosuhteita työntekijöiden työkyvyn turvaamiseksi ja ylläpitämiseksi sekä ennalta ehkäistä ja torjua työtapaturmia, ammattitauteja ja muita työstä ja työympäristöstä johtuvia työntekijöiden fyysisen ja henkisen terveyden haittoja.

41§ - Työssä saadaan käyttää vain sellaisia koneita, työvälineitä ja muita laitteita, jotka ovat niitä koskevien säännösten mukaisia sekä kyseiseen työhön ja työolosuhteisiin sopivia ja tarkoituksenmukaisia. Myös niiden oikeasta asennuksesta sekä tarpeellisista suojalaitteista ja merkinnöistä on huolehdittava. Koneiden, työvälineiden ja muiden laitteiden käyttö ei muutenkaan saa aiheuttaa haittaa tai vaaraa niillä työskenteleville työpaikan työntekijöille tai muille työpaikalla oleville henkilöille.

Koneita, työvälineitä ja muita laitteita on käytettävä, hoidettava, puhdistettava ja huollettava asianmukaisesti. Pääsyä koneen tai työvälineen vaara-alueelle on rajoitettava niiden rakenteen, sijoituksen, suojusten tai turvalaitteiden avulla tai muulla sopivalla tavalla. Huolto-, säätö-, korjaus-, puhdistus-, häiriö- ja poikkeustilanteisiin on varauduttava niin, että ne eivät aiheuta vaaraa tai haittaa työntekijöiden turvallisuudelle tai terveydelle. (Työturvallisuuslaki 2002.)

5.2 Käyttöasetus 403/2008

1§ - Käyttöasetusta sovelletaan koneen, välineen ja muun teknisen laitteen sekä niiden yhdistelmän (työvälineen) käyttöön ja tarkastamiseen työturvallisuuslaissa tarkoitetussa työssä.

4§ - Työnantajan on järjestelmällisesti selvitettävä ja arvioitava työvälineen turvallisuus. Erityisesti tämä on tehtävä tuotannon ja työmenetelmien muutosten yhteydessä. Arvioinnissa on kiinnitettävä huomiota työvälineen ja sen liikkuvien osien, ulkoisen rakenteen, fysikaalisten ja kemiallisten ominaisuuksien, automaattisten toimintojen, sähköön sekä muihin kyseisen työn ja käyttöolosuhteiden aiheuttamiin vaaroihin ja haittoihin.

Jos työvälineen käyttö aiheuttaa vaaraa tai haittaa, työnantajan on ryhdyttävä vaaran tai haitan poistamiseksi tarvittaviin toimenpiteisiin välittömästi. Ensisijaisesti vaara tulee poistaa työvälineen rakenteeseen tai sen ympäristöön liittyvillä teknisillä toimilla, kuten vaara-alueelle pääsyn estävillä tai vaarallisten osien liikkeen ennen vaara-aluetta pysäyttävillä laitteilla. Jos vaaraa ei voida poistaa teknisillä toimilla, työvälineen käytön turvallisuus tulee varmistaa opastuksella, varoituslaitteilla, turvamerkeillä ja henkilönsuojaimilla. (Käyttöasetus 2008.)

5.3 Konedirektiivi 2006/42/EY

Konedirektiivi on saatettu voimaan valtioneuvoston asetuksella koneiden turvallisuudesta (400/2008), ns. koneasetus. Koneasetuksen mukaan valmistajan tai tämän valtuutetun edustajan on ennen koneen markkinoille saattamista tai käyttöönottoa muun muassa:

- varmistettava, että koneelle tehdään riskin arviointi
- varmistettava, että kone täyttää sitä koskevat olennaiset terveys- ja turvallisuusvaatimukset
- varustettava kone tarvittavilla tiedoilla, kuten ohjeilla

Koneasetuksen liitteessä IV lueteltujen konetyyppien vaatimustenmukaisuus on varmentettava erityisellä menettelyllä. (Työsuojelu 2017.)

Valmistajan ei ole pakko soveltaa yhdenmukaistettuja standardeja. Syynä voi olla esimerkiksi se, että kaikille tuotteille ei löydy sopivaa standardia. Jos valmistaja ei käytä yhdenmukaistettua standardia, hänen on osoitettava muuta kautta, että konedirektiivin vaatimukset täytetään. Käytännössä tämä tarkoittaa huolellisen riskin arvioinnin tekemistä sekä laskelmia, analyyskejä ja testejä. Tämä voi olla työlästä, mutta uusien tuotteiden kohdalla välttämätöntä. Riskin arviointi on tehtävä, vaikka käytettäisiinkin yhdenmukaistettuja standardeja. (Metsta 2016.)

5.4 Koneturvallisuuden A-standardi ISO 12100

ISO 12100 on koneturvallisuuden perusstandardi, A-tyyppin standardi, joka esittää yleiset suunnitteluperiaatteet ja näkökohdat turvallisen koneen suunnitteluun. Se esittää myös toimenpiteet riskin arviointiin suunnittelijan näkökulmasta. Riskin arviointia seuraa tarvittaessa riskin pienentäminen. Ensisijainen toimenpide riskin pienentämisessä on luontaisesti turvallisten suunnittelutoimenpiteiden käyttö, eli pyritään suunnittelemaan kone turvalliseksi. Seuraava askel on suojausteknisten toimenpiteiden käyttäminen. Eli lisätään koneeseen suojia ja muita turvateknisiä ratkaisuja, jotka tekevät koneesta turvallisen. Ellei näillä toimenpiteillä pystytä saamaan koneesta turvallista, kohtuullisin kustannuksin, on viimeisenä vaihtoehtona turvautuminen käyttöä koskeviin tietoihin, kuten käyttöohjeet ja varoituskilvet. (SFS-EN ISO 12100.)

5.5 Riskin arviointi SFS-ISO/TR 14121-2

Tämä tekninen raportti antaa käytännön opastusta riskin arviointiin, sekä kuvaa eri menetelmiä ja työkaluja arviointiprosessin eri vaiheita varten. (SFS-ISO/TR 14121-2.)

6 TOTEUTUS

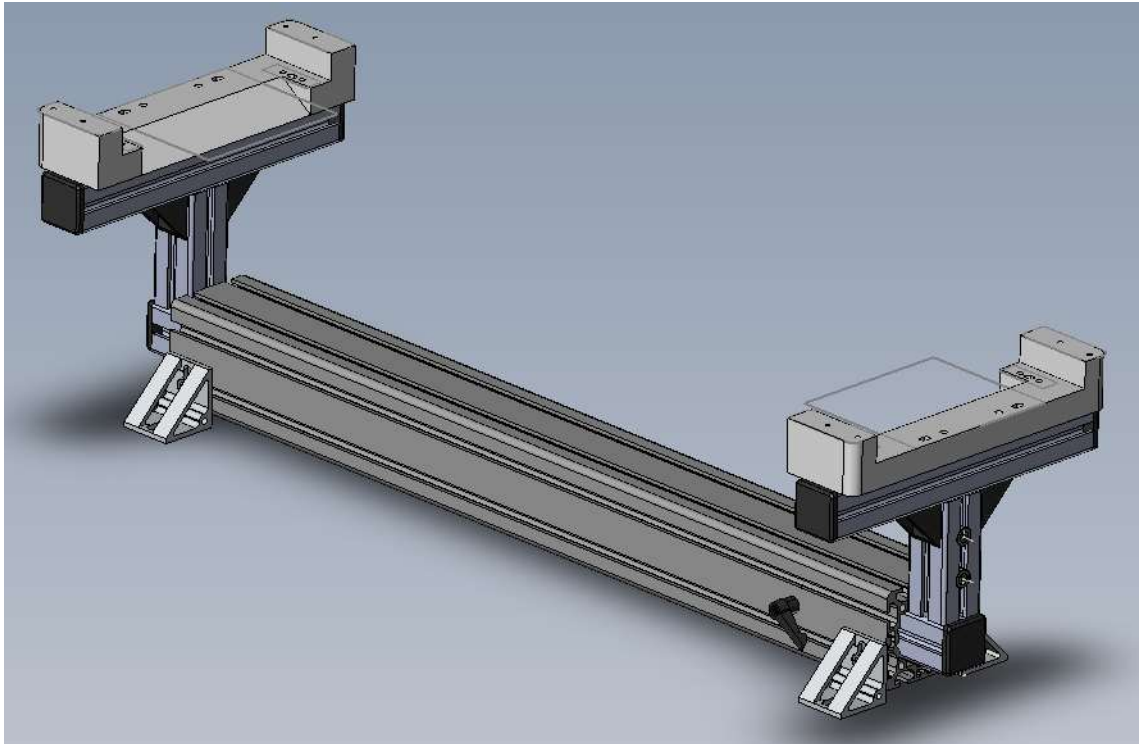
Testauslaitteistoa lähdettiin toteuttamaan edellä esiteltyjä komponentteja käyttäen. Mekaniikan osalta mallinnus tapahtui SolidWorks-ohjelmistolla. Pneumatiikka- ja sähkökaavioiden piirtämisessä apuna käytettiin AutoCAD-ohjelmistoa. Ohjelmiston kehitykseen tarvittava ympäristö asennettiin kokonaisuudessaan RaspberryPi3lle. Ohjelmiston luominen ja testaaminen tapahtuivat siten samalla laitteistolla, eikä erillistä kehitysympäristöä tarvittu.

6.1 Mekaniikka

Jigi mitoitettiin suunnitteluosiossa kerrottujen reunaehtojen mukaisesti. Jigin monipuolista käyttöä silmällä pitäen, varsinaisen jigin ja sen päälle sijoitettavien akselistomoduulien väliin, suunniteltiin vaihdettavat adapteripalat. Koska akselipalkki ja jigi ovat molemmat alumiinia, pyrittiin tällä suojaamaan molempia kulumiselta ja kolhuilta. Adapterin materiaaliksi valittiin POM (Polyasetali). Se on edullista, sitä on yleisesti saatavilla, se on helposti koneistettavaa, sekä sen kitkakerroin on pieni.

Valmistajan esitteessä ilmoitetulla laskukaavalla voitiin laskea raja-arvo suurimmalle voimalle, jonka kyseiset profiilit kestävät. Kuvan 9 osoittamassa asennossa (pituus 857 mm), jigin molempia päitä voidaan kuormittaa 4416 N voimalla. Toisessa ääritapauksessa (pituus 1290 mm), kuormituksen kesto on 1560 N. Molemmissa tapauksissa valmistaja antaa maksimi vääntömomentiksi 400 Nm. Valmiin akselistomoduulin painoksi arvioitiin noin 50 kg, joka vastaa noin 490 N voimaa. Varmuuskertoimeksi tulee siten vähän yli 3. Vääntömomenttia syntyy ainoastaan akselistomoduulin epäsymmetrisestä rakenteesta, joka on pyritty minimoimaan akseliston todellista käyttöä ajatellen.

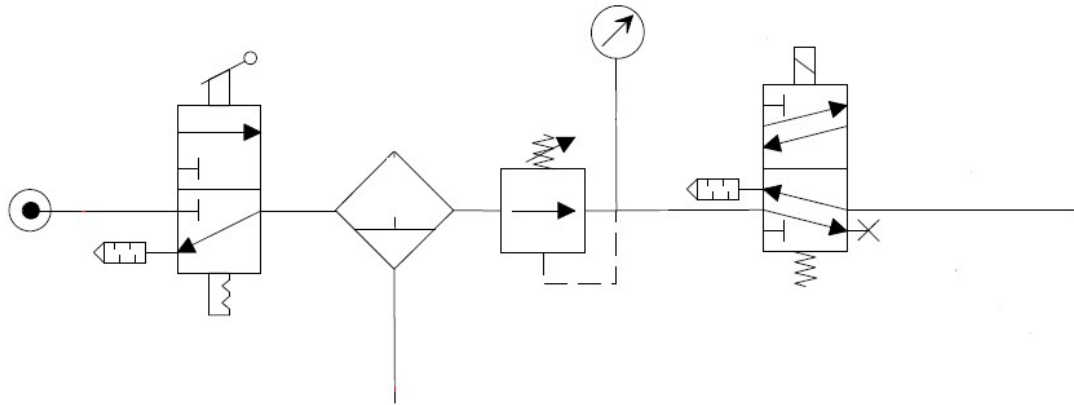
Valmistajan hinnastosta laskettiin myös jigin (kuva 9) kustannusarvio. Kallein osa, jigin runko 80mm x 80mm teleskooppiprofiili maksoi noin 50 euroa. Muiden profiilien hinnat vaihtelivat 5 - 8,50 euron välillä. Loppujen kiinnitystarvikkeiden hinnat vaihtelivat 0,18 - 2,30 euron välillä. Jigin kokonaishinnaksi muodostui 158,56 euroa, ilman POM adapteripaloja



Kuva 9. Jigin SolidWorks-malli.

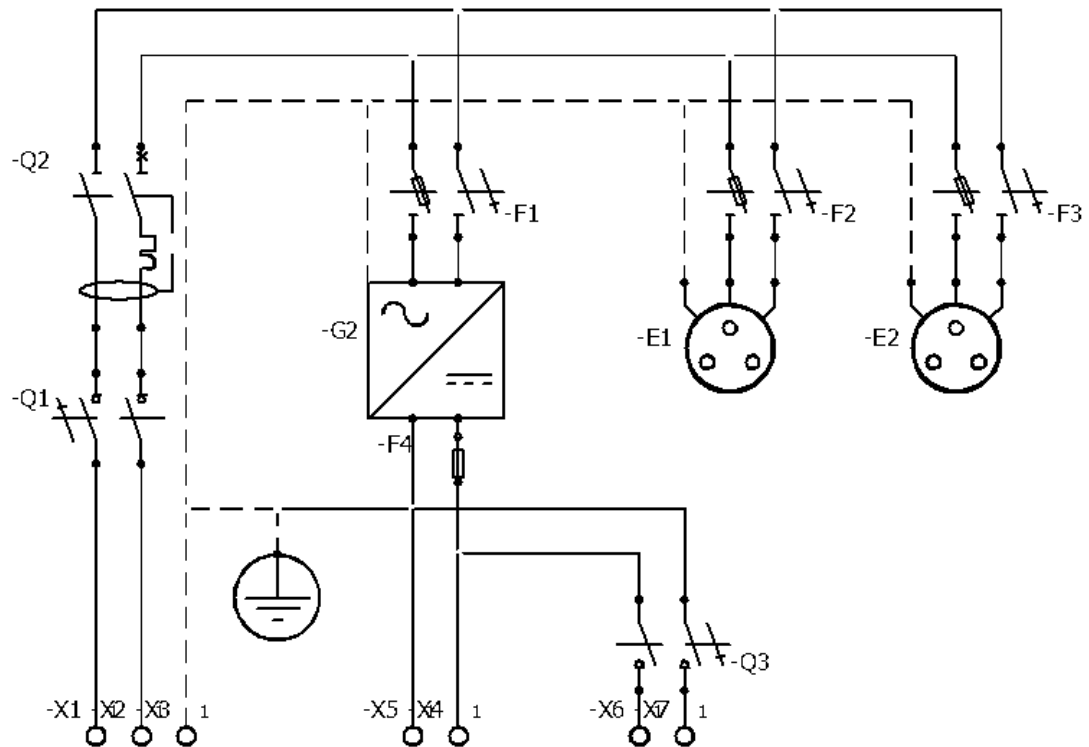
6.2 Pneumatiikka ja sähköistys

Testauslaitteiston pneumatiikkaosio koostui syöttöyksiköstä (kuva 10), aiemmin kerrotun mukaisesti. Paineilman syöttö verkostosta tuodaan TEMA pikaliittimelle ja akselistomoduulien kytkentä tapahtuu 6 mm ja 8 mm letkuliittimillä. Moduulien muut paineilmasyötöt tapahtuvat 6 mm letkulla, mutta Z-akselin kevennys vaatii halkaisijaltaan 8 mm syötön. Syöttölinjan lopussa olevaa venttiiliä ohjataan sähköisesti testauslaitteiston etupaneelissa olevasta kytkimestä.



Kuva 10. Paineilman syöttö.

Sähkösuunnitelmaa päivitettiin edellä olevan venttiilin ohjauksen ja RaspberryPi3n sähkönsyötön osalta (kuva 11). Venttiilin ohjaukseen asennettiin kytkin sekä RaspberryPi3lle ja näytölle pistorasiat. RaspberryPi3n sähkönsyöttö tapahtuu sen mukana toimitetulla 5 V 2.1 A tehollähteellä, joka kytketään pistorasiaan.



Kuva 11. Testauslaitteen kytkentäkaavio.

6.3 Ohjelmisto

Ohjelmistokehitystä varten rakennettiin 1300 BR -jyrsimen yläakselistoa vastaava kokoonpano Beckhoffin IO-moduuleista. Kokoonpano koostui EtherCAT-väylämoduulista EK1100, sekä sen rinnalle kytketyistä I/O-korteista.

RaspberryPi3n muistikortille ladattiin ensimmäiseksi uusien Raspbian Jessie -käyttöjärjestelmä (2017-07-05), joka konfiguroitiin ja päivitettiin yleisten ohjeiden mukaan.

6.3.1 EtherCAT Master -kirjaston käyttöönotto

Seuraavaksi asennettiin EtherCAT Master -kirjasto. Se toimii rajapintana EtherCAT-väylään. Kun kirjasto oli konfiguroitu, käännetty ja kernel-moduuli asennettu, todettiin käyttöjärjestelmän logista sen asentuminen ja käynnistyminen (kuva 12).

```
pi@raspberrypi:~ $ dmesg | grep EtherCAT
[ 6.454923] EtherCAT: Master driver 1.5.2 3be68a020748
[ 6.455269] EtherCAT: 1 master waiting for devices.
[ 6.473936] ec_generic: EtherCAT master generic Ethernet device module 1.5.2
3be68a020748
[ 6.473966] EtherCAT: Accepting B8:27:EB:E2:42:33 as main device for master 0
.
[ 6.526925] EtherCAT 0: Starting EtherCAT-IDLE thread.
pi@raspberrypi:~ $
```

Kuva 12. EtherCAT-moduuli käynnissä.

Tämän jälkeen Beckhoff IO-moduulit kytkettiin verkkokaapelilla kiinni Raspberry3een. Edellä asennettu kirjasto tunnisti väylään kytketyt moduulit automaattisesti (kuva 13).

```
[ 7.295481] EtherCAT 0: Link state of ecm0 changed to UP.
[ 7.315394] EtherCAT WARNING 0: 1 datagram TIMED OUT!
[ 8.175375] EtherCAT 0: Link state of ecm0 changed to DOWN.
[ 9.065347] EtherCAT 0: Link state of ecm0 changed to UP.
[ 9.085367] EtherCAT 0: 6 slave(s) responding on main device.
[ 9.085374] EtherCAT 0: Slave states on main device: PREOP.
[ 9.085833] EtherCAT 0: Scanning bus.
[ 9.998417] EtherCAT 0: Bus scanning completed in 910 ms.
[ 9.998426] EtherCAT 0: Using slave 0 as DC reference clock.
```

Kuva 13. Laitteet tunnistettu EtherCAT-väylässä.

EtherCAT Master -kirjaston mukana tullut komentorivipohjainen ohjelma mahdollisti tässä vaiheessa ensimmäisten komentojen syöttämisen EtherCAT-väylälle. Kuvassa 14 on tietoa väylältä löydetyistä moduuleista. Alussa on kerrottu laitteiden sijainti väylällä, sitten yksittäisten laitteiden tila ja lopussa niiden yksityiskohtainen kuvaus.

```
pi@raspberrypi:~ $ ethercat slaves
0 0:0 PREOP + EK1100 EtherCAT-Koppler (2A E-Bus)
1 0:1 PREOP + EL2809 16K. Dig. Ausgang 24V, 0.5A
2 0:2 PREOP + EL1859 8K. Dig. Eingang 24V, 3ms, 8K. Dig. Ausgang 24V, 0.5A
3 0:3 PREOP + EL1809 16K. Dig. Eingang 24V, 3ms
4 0:4 PREOP + EL7342 2K. DC-Motor-Endstufe (50V, 3.5A)
5 0:5 PREOP + EL9505 Netzteilklemme 5V
pi@raspberrypi:~ $
```

Kuva 14. Kaikki väylältä löydetyt moduulit.

EtherCAT Master -kirjaston avulla voidaan kirjoittaa ohjelma, joka kommunikoi EtherCAT-väylään liitettyjen moduulien kanssa, käyttäen libethercat-kirjastoa. Tämä on hierarkiassa alin taso, jolle oma ohjelma voidaan kirjoittaa. Siten sen ensisijainen tavoite on reaaliaikaisten toimintojen suorittaminen, kuten liikkeenohjaukset.

PDOn käytetään sykliseen kommunikointiin väylässä. Ne voivat olla joko RxPDO-tyypisiä, joilla välitetään tietoa isännältä orjille tai TxPDO-tyypisiä, joilla välitetään tietoa orjilta isännälle. Periaatteessa isäntälaitteen muistiin on kopioitu kaikkien orjien muistiavaruus, yksi toisensa perään.

Jotta EtherCAT-väylässä olevien moduulien kanssa voitiin kommunikoida, tarvittiin niiden osoiteavaruudesta tarkempaa tietoa. Komentorivipohjaisella esimerkkiohjelmalla tämä onnistui kuvan 15 tavalla.

```

pi@raspberrypi:~ $ ethercat pdos
=== Master 0, Slave 1 ===
SM0: PhysAddr 0x0f00, DefaultSize 1, ControlRegister 0x44, Enable 9
  RxPDO 0x1600 "Channel 1"
    PDO entry 0x7000:01, 1 bit, "Output"
  RxPDO 0x1601 "Channel 2"
    PDO entry 0x7010:01, 1 bit, "Output"
  RxPDO 0x1602 "Channel 3"
    PDO entry 0x7020:01, 1 bit, "Output"
  RxPDO 0x1603 "Channel 4"
    PDO entry 0x7030:01, 1 bit, "Output"
  RxPDO 0x1604 "Channel 5"
    PDO entry 0x7040:01, 1 bit, "Output"
  RxPDO 0x1605 "Channel 6"
    PDO entry 0x7050:01, 1 bit, "Output"
  RxPDO 0x1606 "Channel 7"
    PDO entry 0x7060:01, 1 bit, "Output"
  RxPDO 0x1607 "Channel 8"
    PDO entry 0x7070:01, 1 bit, "Output"
SM1: PhysAddr 0x0f01, DefaultSize 1, ControlRegister 0x44, Enable 9
  RxPDO 0x1608 "Channel 9"
    PDO entry 0x7080:01, 1 bit, "Output"
  RxPDO 0x1609 "Channel 10"

```

Kuva 15. Väylän orjien PDO-osoitteita.

Kun väylän konfiguraatio ja orjien osoitteet olivat tiedossa, voitiin kirjoittaa ensimmäinen ohjelma. Kuvan 16 pääohjelma on esimerkki kirjaston ja EtherCAT-isännän käyttöön-otosta.

```

#include <ecrt.h>

int main(void)
{
    ec_master_t *master = ecrt_request_master(0);

    if (!master)
        return 1; // error

    pause(); // wait for signal
    return 0;
}

```

Kuva 16. Esimerkki pääohjelmasta. (EtherLab 2017a.)

Varsinaisen prosessidatan käsittely suoritetaan omassa aliohjelmassaan (kuva 17). Jokaisella suorituskerralla väylässä olevien orjien tilat synkronoidaan isännän muistiin,

suoritetaan halutut datan prosessoinnit, sekä synkronoidaan isännän muistissa oleva tila takaisin orjille.

```
void cyclic_task()
{
    // receive process data
    ecrt_master_receive(master);
    ecrt_domain_process(domain1);

    // read process data
    DigIn_in = EC_READ_U8(domain1_pd + off_DigIn_in);

    // calculate new process data
    blink = !blink;

    // write process data
    EC_WRITE_U8(domain1_pd + off_dig_out, blink ? 0x06 : 0x09);

    // send process data
    ecrt_domain_queue(domain1);
    ecrt_master_send(master);
}
```

Kuva 17. Esimerkki prosessidatan käsittelystä.

6.3.2 PdServ-kirjaston käyttöönotto

PdServ-kirjasto mahdollistaa MSR-protokollan käytön ja ei-reaaliaikaisen kytkeytymisen EtherCAT-väylän moduuleihin, EtherCAT Master -kirjaston avulla.

Kuvassa 18 on esitetty PdServ-kirjaston periaatteellinen käyttö. Tarvittavien alustusten jälkeen oleellisin osa kirjastoa ovat funktiot `pdserv_signal` ja `pdserv_parameter`. Molemmat funktiot linkittävät ohjelmassa käytetyt muuttujat MSR-protokollan mukaiseen tiedostopolkuun. `Pdserv_signal` viittaa kenttäväylältä luettuihin arvoihin, joiden muuttuminen aiheuttaa päivityksen MSR-protokollan arvoihin. `Pdserv_parameter` puolestaan toimii toisin päin. Kun polun arvo muuttuu, se aiheuttaa muutoksen kenttäväylän suuntaan.

```

int main(int argc, const char *argv[])
{
    struct pdserv *pdserv = pdserv_create(program_invocation_short_name, "1.0", gettimeofday);

    struct pdtask *task[1];

    if (argc > 1)
        pdserv_config_file(pdserv, argv[1]);

    task[0] = pdserv_create_task(pdserv, 0.1, "Task1");

    assert(pdserv_signal(task[0], 1, "/path/to/DigInOut_in", pd_uint8_T, &DigInOut_in, 1, NULL, NULL, NULL));

    struct pdvariable *p1 = pdserv_parameter(pdserv, "/path/to/DigOut_out", 0666, pd_uint8_T, &DigOut_out, 1, 0, 0, 0);
    assert(p1);

    assert(!pdserv_prepare(pdserv));

    printf("Server started.\n");
    while (1)
    {
        pause();
    }

    pdserv_exit(pdserv);
    return 0;
}

```

Kuva 18. PdServ-kirjaston periaatteellinen käyttö.

EtherCAT Master ja PdServ -kirjastoja käyttämällä voitiin kirjoittaa palvelinohjelmisto, joka kytkeytyy kenttäväylään ja välittää siellä kulkevan prosessidatan MSR-protokollan mukaisesti siihen kytkeytyville asiakkaille. Kuvassa 19 nähdään palvelinohjelmiston käynnistytksen jälkeisiä tietoja. Kuvassa näkyy myös TestManager asiakasohjelman kytkeytyminen MSR-protokollan avulla.

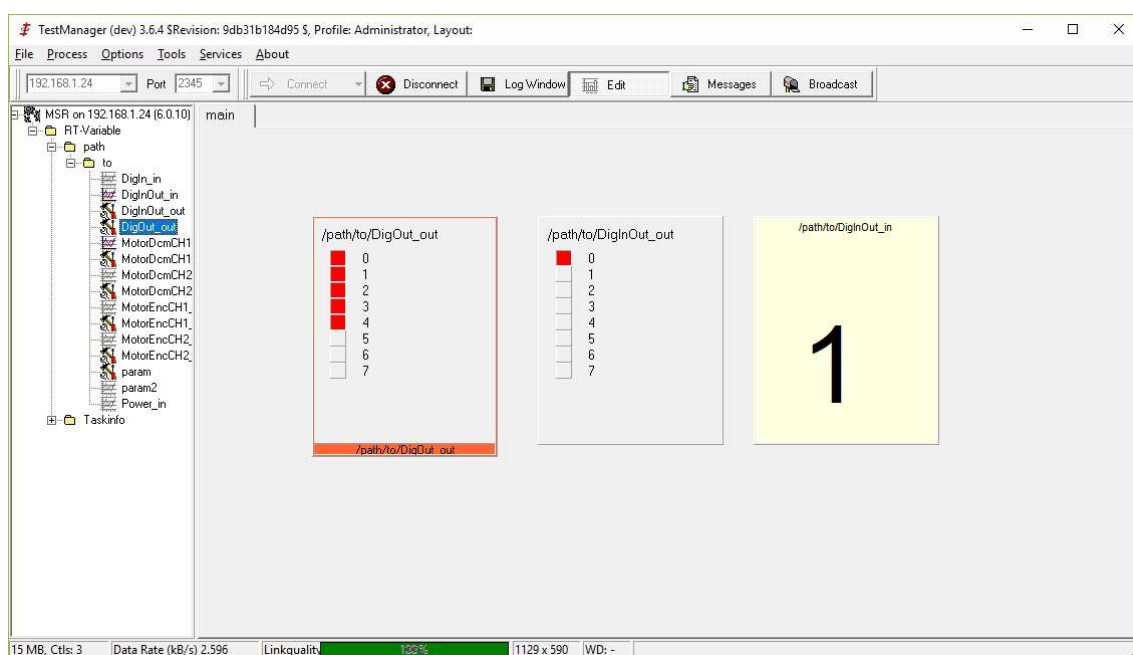
```

pi@raspberrypi: ~
File Edit Tabs Help
2017-11-19 10:55:46 INFO root : Starting servers
Activating master...ok!
Domain data registered ok.
6 slave(s).
AL states: 0x02.
Link is up.
Starting timer...
Started.
2017-11-19 10:55:46 DEBUG msr : Limiting XML input buffer to 4bytes
2017-11-19 10:55:46 INFO msr : Initializing MSR server
2017-11-19 10:55:46 INFO msr : Server started on 192.168.1.24:2345
2017-11-19 10:57:34 DEBUG msr : New client connection
2017-11-19 10:57:34 INFO msr 192.168.1.23:51607: New session
2017-11-19 10:57:34 TRACE msr 192.168.1.23:51607: ping
2017-11-19 10:57:34 TRACE msr 192.168.1.23:51607: read_parameter
2017-11-19 10:57:34 TRACE msr 192.168.1.23:51607: read_kanaele
2017-11-19 10:57:34 TRACE msr 192.168.1.23:51607: remote_host
2017-11-19 10:57:34 INFO msr 192.168.1.23:51607: Logging in tate@DESKTOP-E01ASRM
application TestManager (dev) 3.6.4 $Revision: 9db31b184d95 $ writeaccess=1
2017-11-19 10:57:34 TRACE msr 192.168.1.23:51607: rs
2017-11-19 10:57:34 TRACE msr 192.168.1.23:51607: xsad
2017-11-19 10:57:35 TRACE msr 192.168.1.23:51607: ping
2017-11-19 10:57:35 TRACE msr 192.168.1.23:51607: rs

```

Kuva 19. Palvelinohjelmisto käynnissä.

MSR-protokolla mahdollistaa palvelinohjelmistoon kytkeytymisen lähiverkon avulla. Ku-
van 20 TestManager asiakasohjelma oli käynnissä erillisellä tietokoneella.



Kuva 20. TestManager ohjelmisto.

6.3.3 Asiakasohjelmisto ja käyttöliittymä

QtPdWidgets-kirjasto sisältää valmiita komponentteja, jotka käyttävät PdCom-kirjaston mukaisesti MSR-protokollaa. Ylemmällä tasolla ohjelmiston toteutus vastaa Qt4 ympäristöä. Qt on ensisijaisesti graafisten käyttöliittymien ohjelmointiin suunniteltu kehitysympäristö, jonka syntaksi noudattaa C++ ohjelmointikieltä. Kuvan 21 pääohjelma välittää käynnistysvaiheessa annetut parametrit applikaatiolle, luo esiintymän pääikkunasta sekä asettaa sen näkyväksi.

```
#include <QApplication>

#include "MainWindow.h"

/*****

int main(int argc, char *argv[])
{
    QApplication app(argc, argv);
    MainWindow mainWin;
    mainWin.show();
    return app.exec();
}

*****/
```

Kuva 21. Qt pääohjelma.

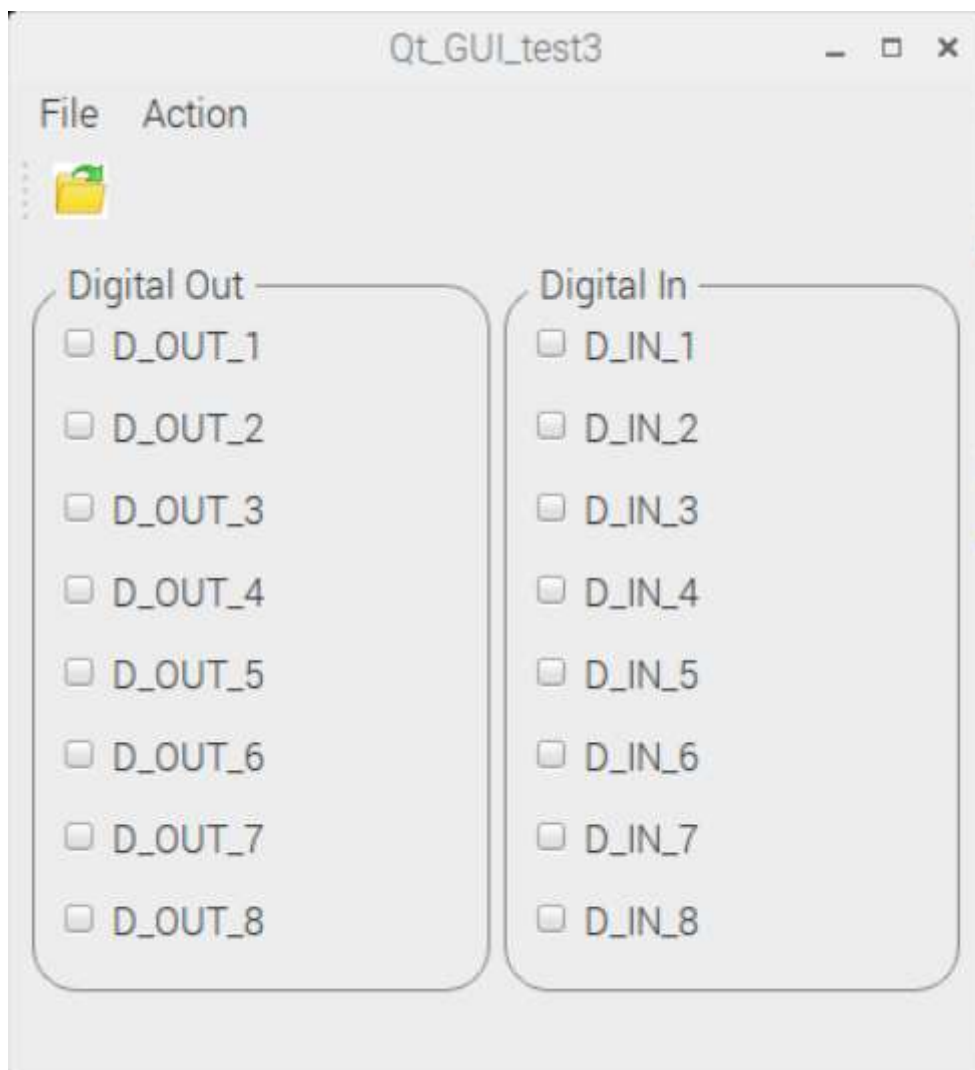
Ohjelman kaikki muut toiminnot on jaoteltu erillisiin moduuleihin ja tiedostoihin. Käyttöliittymän muuttujat kytkettiin MSR-protokollan polkuihin kuvassa 22 lähes samalla tavalla kuin palvelinohjelmassa, kuvassa 18.

```
void MainWindow::processConnected()
{
    actionDisconnect->setEnabled(1);

    if ((pvin = p.findVariable("/path/to/DigInOut_in"))) {
        pdDigital->setVariable(pvin, 0.0f, 1.0);
    } else {
        qCritical() << "variable not found." << endl;
    }
}
```

Kuva 22. Käyttöliittymän muuttujien linkittäminen MSR-protokollaan.

Muuttujien arvoja voitiin sen jälkeen muuttaa esimerkiksi painonappien avulla, tai niiden arvo voitiin näyttää käyttäjälle sopivassa muodossa. Käyttöliittymä jaoteltiin helposti ymmärrettäviin kokonaisuuksiin kuvan 23 mukaisesti.



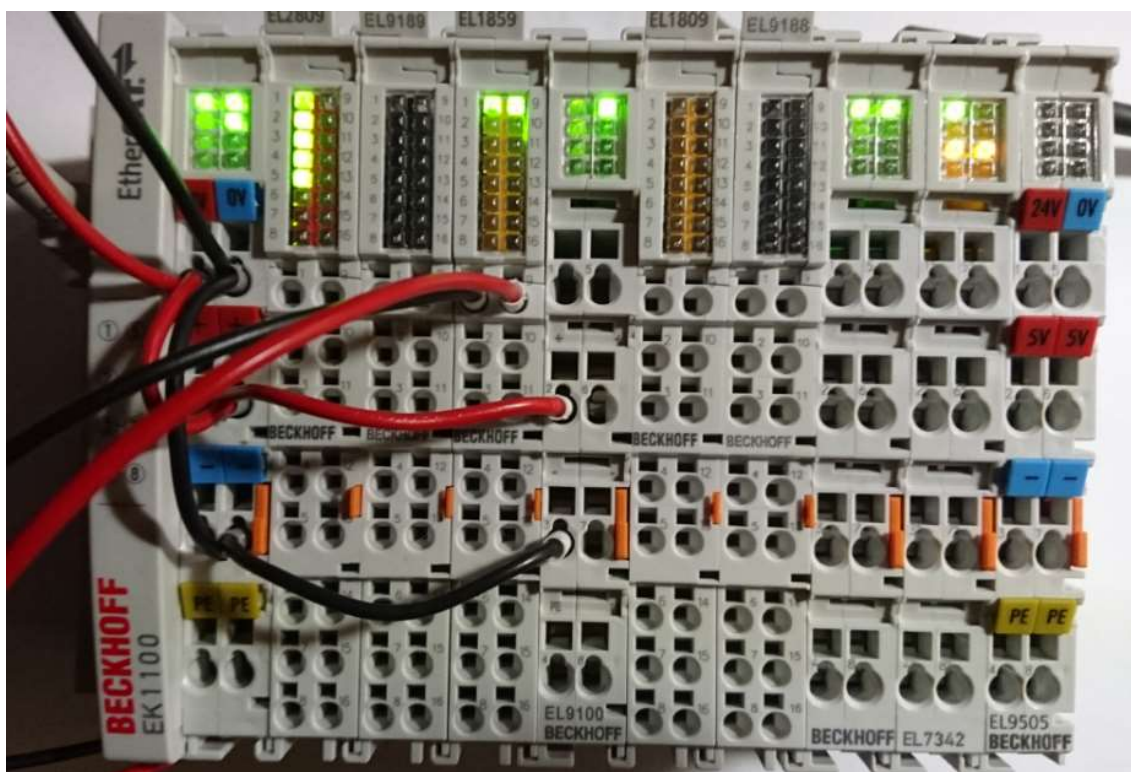
Kuva 23. Käyttöliittymän komponentteja.

EL1859-moduuli sisälsi kahdeksan digitaalista lähtöä sekä kahdeksan digitaalista tuloa. Vakiokäytössä olevat tulot ja lähdöt nimettiin niiden tarkoitusta kuvaavilla nimillä. Esimerkiksi kuvan 23 D_OUT_1 kytkeytyy valmiissa laitteessa etupaneelin pysäytyskytkimeen, I232:I_StopButtonFront. Eri moduulien näkymät jaoteltiin käyttöliittymässä omille välilehdilleen.

6.4 Testaus

Ohjelmiston testauksessa käytettiin 1300 BR -jyrsimen yläakseliston väylämoduulia (kuva 24). Käytettyjen IO-moduulien tiloja indikoivat jokaisessa moduulissa olevat ledit. Ledien avulla pystyttiin todentamaan digitaalisten lähtöjen tilat. Tulojen testausta varten

kytkettiin hyppylanka 24 V jännitteeseen, jolla yksittäisten tulojen tilaan pystyttiin vaikuttamaan. Yksi kytkentä tehtiin myös lähtöportista suoraan tuloporttiin, jolloin koko ketjun toimintaa pystyttiin seuraamaan suoraan ohjelmasta, ilman tarvetta vaikuttaa fyysiseen kytkentään.



Kuva 24. Testauksessa ja kehityksessä käytetty väylämoduuli.

6.5 Testauslaitteen käyttöohje

Koska laitetta ei kokonaisuutena ehditty rakentamaan, on käyttöohje periaatteellinen kuvaus laitteiston toiminnasta.

1. Liitetään laite sähköverkkoon pistotulpalla ja kytketään paineilman syöttö pikaliitimellä.
2. Tarkistetaan paineilman syöttöyksikön paineensäätimen arvo ja säädetään tarpeen vaatiessa testattavalle moduulille sopiva paine.
3. Kytketään testattavan moduulin sähkönsyöttö, kenttäväylä ja paineilimaliittimet testauslaitteistoon.
4. Kytketään testauslaitteiston päävirta päälle.

5. Kun RaspberryPi3 on käynnistynyt, käynnistetään palvelinohjelmisto. Jos palvelinohjelmisto käynnistyy ilman huomautuksia, on se löytänyt kenttäväylästä testattavat laitteet.
6. Käynnistetään varsinaisen testausohjelman käyttöliittymä, joka kytkeytyy automaattisesti käynnistettyyn palvelinohjelmistoon.
7. Aktivoidaan paineilman syöttö testeriltä testattavalle moduulille.
8. Testaus suoritetaan erillisten testausohjeiden mukaisesti.

Kun testaus on suoritettu, laitteiston sammuttaminen tapahtuu käänteisessä järjestyksessä.

1. Suljetaan paineilman syöttö testeriltä moduulille.
2. Suljetaan testausohjelma ja sen jälkeen palvelinohjelma.
3. Kirjaututaan ulos tietokoneesta ja ajetaan se alas.
4. Kun tietokone on sammunut, voidaan katkaista päävirta.
5. Irrotetaan testattava moduuli testauslaitteistosta.
6. Irrotetaan testauslaitteisto sähkö- ja paineilmaverkoista.

Käytännössä testaus tapahtuu yksittäisiin antureihin vaikuttamalla ja toteamalla oikean tuloportin tilan muutos testauslaitteen ohjelmistolta. Lähtöporttien tilaan voidaan vaikuttaa ohjelmistolla, jolloin testaajan tehtäväksi jää todeta oikean toimilaitteen vaikuttaminen.

7 TULOSTEN ANALYSOINTI

Työ oli mielenkiintoinen kokonaisuus, sisältäen mekaniikka-, sähkö- ja ohjelmistosuunnittelua. Ilman aiempaa ohjelmistotaustaa ei työssä olisi päästy näin pitkälle. Ohjelmistosuunnittelun ja ohjelmoinnin osuus työhön käytetystä ajasta oli noin 40 %. Mekaniikkasuunnittelun osuus oli noin 25 %.

7.1 Aikataulu

Kokonaisuuden suoritus jakautui ajallisesti hyvin epätasaiseksi, joka oli tiedossa työtä aloitettaessa. Noin 90 % työstä tehtiin kahden, noin kuuden viikon mittaisen jakson aikana. Alkuperäisen aikataulun ja suunnitelman mukaisesti, testauslaite olisi ehditty myös rakentamaan ja testaamaan kokonaisuudessaan, mutta näin ei kuitenkaan käynyt. Käytetyn ajan puitteissa testauslaitteen rakentamista ei ehditty aloittaa ja sen testaus muodostui siten lähinnä ohjelmistotestaukseksi, sitä kehitettäessä. Aikataulu oli siis turhan optimistinen.

7.2 Budjetti

Testauslaitteen kustannusten ylärajaa ei oltu määritelty, mutta taloudellinen riski yritettiin minimoida kaikilla osa-alueilla. Mekaniikan hinta-arvioksi saatiin noin 158 euroa. RaspberryPi3 sekä siihen liittyvät komponentit kustantavat noin 95 euroa. Laitteiston kotelon hinnaksi arvioitiin noin 70 euroa, sekä paineilman huoltoyksikön ja muiden tarvittavien liittimien ja pientarvikkeiden hinnaksi noin 80 euroa. Testauslaitteiston kokonaishinnaksi saatiin siten noin 400 euroa.

7.3 Tavoitteet

Työn tavoitteeksi oli asetettu akselistomoduulien sähköisten komponenttien testaus. Käytetyn ajan puitteissa ei päästy servo- ja lineaarimoottoreiden ohjaukseen asti. Niiden ohjauksen toteutus olisi vaatinut huomattavasti enemmän perehtymistä servovahvistimien parametreihin ja tarvittavan moottorinohjauslogiikan ohjelmointiin. Periaatteellisella

tasolla, se olisi ollut kuitenkin mahdollista nyt suunnitellulla laitteistolla. Moottorien ohjauksen seurauksena, olisi ollut tarpeen tutkia uudelleen myös koneturvallisuusnäkökohdat.

Myös jyrsinmoottorin ohjaus olisi tarvinnut erillisen ohjaimen, jonka käyttöönottoon ei ehditty perehtyä. Se olisi myös nostanut järjestelmän hintaa, kuten moottorien ohjauksessa tarvittavat servovahvistimetkin.

Suunniteltu laitteisto ja sen puitteissa toteutettu ohjelmisto, mahdollistavat akselistomoduulien kenttäväylässä olevien tulo- ja lähtökorttien ja niihin kytkettyjen antureiden sekä toimilaitteiden testauksen. Tavoitteiden mukaisen lopputuloksen saavuttaminen olisi ollut mahdollista perusteellisemmän esiselvityksen avulla.

7.4 Jatkokehitys

Vaikka työssä käytettiin valmiita kirjastoja, vaati ohjelmistokehitys huomattavan osan ajasta. Vastaavan työn toteuttaminen kaupallisilla ohjelmistoilla olisi ollut huomattavasti helpompaa. Esimerkiksi moottorien ohjaukseen tarvittava ohjauslohko löytyy useimmilta valmistajilta valmiina käyttöönotettavaksi. Suunnitellulla kokoonpanolla moottorien ohjaus olisi kuitenkin mahdollista, jolloin järjestelmästä tulisi entistä kannattavampi.

Manuaalisen testauksen lisäksi järjestelmään olisi mahdollista ohjelmoida automaattisia testaussekvenssejä, joilla voitaisiin suorittaa esimerkiksi lyhyemmän aikavälin luotettavuustestejä.

LÄHTEET

AluFlex 2017. Light Telescopic Rail. Viitattu 9.11.2017. http://www.aluflex.com/Kategori_5_en.html.

Cencorp 2017a. Company. Viitattu 3.11.2017. <https://cencorpautomation.com/company/>.

Cencorp 2017b. History. Viitattu 3.11.2017. <https://cencorpautomation.com/company/history/>.

Cencorp 2017c. New appointments in cencorp automation top management. Viitattu 3.11.2017. <https://cencorpautomation.com/blog/2017/07/13/new-appointments-cencorp-automation-top-management/>.

Cencorp 2017d. Products. Viitattu 3.11.2017. <https://cencorpautomation.com/products/>.

Cencorp 2017e. Cencorp 300LM Desktop Laser Marker. Viitattu 5.11.2017. <https://cencorpautomation.com/blog/product/cencorp-300lm-desktop-laser-marker/>.

Cencorp pörssitiedote 2014. Cencorp sopinut elektroniikkateollisuuden automaatioliiketoimintansa enemmistöosuuden myymisestä. Viitattu 3.11.2017. <https://www.kauppa-lehti.fi/5/i/porssi/tiedotteet/porssitiedote.jsp?id=201408250013&comid=CNC>.

EtherCAT 2017. Technical Introduction and Overview. Viitattu 12.11.2017. <https://www.ethercat.org/en/technology.html>.

EtherLab 2017. Homepage of EtherLab. Viitattu 12.11.2017. <https://www.etherlab.org/en/index.php>.

EtherLab 2017a. Architecture. Viitattu 12.11.2017. <https://www.etherlab.org/download/ethercat/ethercat-1.5.2.pdf>.

EtherLab 2017b. EtherLab Components. Viitattu 12.11.2017. <https://www.etherlab.org/en/components.php>.

EtherLab 2017c. Kommunikation zwischen Client und Server. Viitattu 12.11.2017. https://www.etherlab.org/download/m-igh_rt_api.pdf.

EtherLab 2017d. PdCom Library. Viitattu 12.11.2017. <https://www.etherlab.org/en/pdcom/index.php>.

EtherLab 2017e. Testmanager. Viitattu 12.11.2017. <https://www.etherlab.org/en/testmanager/index.php>.

EtherLab 2017f. QtPdWidgets Library. Viitattu 12.11.2017. <https://www.etherlab.org/en/pdwidgets/index.php>.

Euroopan unioni 2017. Asetukset, direktiivit ja muut säädökset. Viitattu 12.11.2017. https://europa.eu/european-union/eu-law/legal-acts_fi.

Käyttöasetus 2008. Käyttöasetus. Viitattu 12.11.2017. <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2008/20080403>.

Korhonen H. 2016. EtherCAT-isäntä Linuxissa. Viitattu 12.11.2017. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:oulu-201612103256>.

Laukkanen Paavo 2013. Investoinnin kannattavuus ja investointiprosessi. Viitattu 8.11.2017. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2013112217878>.

MayTec 2017. The Telescopic System. Viitattu 9.11.2017. <http://www.maytec.de/index.php?id=80&L=1>.

Metsta 2016. Koneturvallisuuden standardit. Viitattu 12.11.2017. http://www.sfsedu.fi/files/129/Koneturvallisuuden_standardit_2016.pptx.

Modular Components 2017. Track Profile Systems. Viitattu 9.11.2017. <http://www.modularcomponents.com.au/wp-content/uploads/Aluminium-Track-Profile.pdf>.

Qt 2017. Software development made smarter. Viitattu 12.11.2017. <https://www.qt.io/>.

Suomen Automaatioseura ry. Laatu automaatiassa, parhaat käytännöt. Viitattu 5.11.2017. <https://www.automaatioseura.fi/site/assets/files/1367/laatuautomaatiassa.pdf>.

Toyota 2016. Poka-yoke – Toyota Production System guide. Viitattu 2.11.2017. <http://blog.toyota.co.uk/poka-yoke>.

Työsuojelu 2017. Valmistaja. Viitattu 12.11.2017. <http://www.tyosuojelu.fi/markkinavalvonta/koneet-ja-laitteet/valmistaja>.

Työturvallisuuslaki 2002. Työturvallisuuslaki. Viitattu 12.11.2017. <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2002/20020738>.